МЕХАНИКА
MECHANICS







УДК 539.3

Научная статья

https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-224-231



Микротвердость и динамический предел текучести медных образцов при ударе по жесткой стенке

Н. В. Пахнутова[1,2] ✉, **Е. Н. Боянгин**[1], **О. А. Шкода**[1], **С. А. Зелепугин**[1,2]

[1]Национальный исследовательский Томский государственный университет, Российская Федерация, г. Томск, пр. Ленина, 36

[2]Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, Российская Федерация, г. Томск, пр. Академический, 10/4

✉ nadin_04@mail.ru

Аннотация

Введение. Одним из часто применяемых методов для оценки динамических характеристик материала является тест Тейлора, который устанавливает связь динамического предела текучести материала цилиндрического образца с его длиной после удара по недеформируемой преграде. Целью данной работы является исследование микротвердости и определение динамического предела текучести медных образцов для различных скоростей удара в тесте Тейлора.

Материалы и методы. Эксперименты проводились с образцами из меди (М1) цилиндрической формы. На баллистическом стенде были подобраны условия метания, которые обеспечивали на выходе из ствола скорость движения образца в диапазоне 150–450 м/с. После удара измерялась микротвердость образцов в плоскости разреза. Расчет динамического предела текучести проводили по классической формуле Тейлора.

Результаты исследования. Представлены экспериментальные данные для медных образцов цилиндрической формы при ударе по жесткой стенке со скоростями в диапазоне 162–416 м/с, включая конфигурации и размеры образцов до и после удара. Получены распределения микротвердости в осевом сечении образцов. Для каждого образца были построены зависимости усредненных значений микротвердости, которые позволили выделить четыре области деформирования образцов (область упругих деформаций, пластических деформаций, интенсивных пластических деформаций, область материала, подвергающегося разрушению) и определить их размеры. Рассчитан динамический предел текучести меди в исследованном диапазоне скоростей удара.

Обсуждение и заключения. Значения микротвердости во всей рассматриваемой области и для всех исследованных скоростей удара превышают исходное значение. Имеет место существенное увеличение значения динамического предела текучести по сравнению с его статическим значением. Выявлена корреляция максимальных усредненных значений микротвердости и динамического предела текучести, которые возрастают с ростом скорости удара.

Ключевые слова: тест Тейлора, медный цилиндр, высокоскоростной удар, микротвердость, деформирование, динамический предел текучести.

Благодарности. Авторы благодарят Ю. Ф. Христенко, доктора технических наук, ведущего научного сотрудника НИИПММ ТГУ (Томск) за помощь в проведении экспериментов. Авторы выражают признательность рецензентам.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ТНЦ СО РАН, проект № 121031800149–2.

Для цитирования. Микротвердость и динамический предел текучести медных образцов при ударе по жесткой стенке / Н. В. Пахнутова, Е. Н. Боянгин, О. А. Шкода, С. А. Зелепугин // Advanced Engineering Research. — 2022. — Т. 22, № 3. — С. 224–231. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-224-231

Original article

Microhardness and Dynamic Yield Strength of Copper Samples upon Impact on a Rigid Wall

Nadezhda V. Pakhnutova[1,2], Evgeniy N. Boyangin[2], Olga A. Shkoda[2], Sergey A. Zelepugin[1,2]

[1]National Research Tomsk State University, 36, Lenin Avenue, Tomsk, Russian Federation

[2]Tomsk Scientific Center, Siberian Branch, RAS, 10/4, Akademichesky Av., Tomsk, Russian Federation

nadin_04@mail.ru

Abstract

Introduction. One of the commonly used methods for assessing the dynamic characteristics of a material is the Taylor test, which establishes the relationship between the dynamic yield strength of a cylindrical sample material and its length after hitting a non-deformable barrier. The purpose of this work was to study the microhardness and determine the dynamic yield strength of copper samples for various impact velocities in the Taylor test.

Materials and Methods. Experiments were carried out with cylindrical copper (M1) samples. The throwing conditions were selected on the ballistic stand, which provided the speed of the sample in the range of 150–450 m/s at the exit from the barrel. After the impact, the microhardness of the samples in the section plane was measured. The calculation of the dynamic yield strength was carried out according to the classical Taylor formula.

Results. Experimental data are presented for cylindrical copper samples upon impact on a rigid wall with velocities in the range of 162–416 m/s, including configurations and sizes of images before and after impact. Microhardness distributions in the axial section of the samples were obtained. For each sample, the dependences of the averaged values of microhardness were constructed, which made it possible to identify four areas of deformation of the samples (the area of elastic deformations, plastic deformations, intense plastic deformations, the area of the material undergoing destruction) and determine their sizes. The dynamic yield strength of copper in the studied range of impact velocities was calculated.

Discussion and Conclusions. The values of microhardness in the entire considered region and for all studied impact velocities exceeded the initial value. There was a significant increase in the value of the dynamic yield strength compared to its static value. The correlation of the maximum averaged values of microhardness and dynamic yield strength, which grew with increasing impact velocity, was identified.

Keywords: Taylor test, copper cylinder, high-speed impact, microhardness, deformation, dynamic yield strength.

Acknowledgments. The authors would like to thank Yu. F. Khristenko, Dr.Sci (Engineering), leading researcher of the Scientific Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Tomsk State University (Tomsk), for his assistance in conducting experiments. The authors express their gratitude to reviewers.

Funding information. The research is done within the frame of the government task from Tomsk Scientific Center, Siberian Branch, RAS (no. 121031800149–2).

For citation. N. V. Pakhnutova, E. N. Boyangin, O. A. Shkoda, S. A. Zelepugin. Microhardness and Dynamic Yield Strength of Copper Samples upon Impact on a Rigid Wall. Advanced Engineering Research, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 224–231. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-224-231

Введение. Развитие в научно-технических областях, связанных с динамическим нагружением тел, во многом зависит от создания новых материалов с заданными свойствами. Это явилось толчком для активных экспериментальных, аналитических и численных исследований, связанных с динамическим нагружением деформируемых твердых тел [1–4].

Одним из часто применяемых методов для оценки динамических характеристик материала является тест (метод, задача) Тейлора. Метод Тейлора устанавливает связь динамического предела текучести материала цилиндрического образца с его длиной после удара по недеформируемой преграде (жесткой стенке). Данный

подход часто используется для определения динамического предела текучести новых материалов [5–8], а также для выбора определяющих соотношений и подбора констант при численном моделировании [9–14].

Для ускорения тел с заданной формой применяются легкогазовые установки (ЛГУ). Эти установки дают возможность получить скорость метания до 7–9 км/с, в отдельных экспериментах до 11 км/с, благодаря чему получили широкое применение в газодинамике, баллистике, материаловедении и т. д. В НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета разработана одноступенчатая легкогазовая установка [15], в которой образец ускоряется сжатым газом (гелием), подаваемым из баллона. Она была использована для проведения экспериментов по методу Тейлора, представленных в этой работе.

Целью данной работы является исследование микротвердости и определение динамического предела текучести медных образцов для различных скоростей удара в тесте Тейлора.

Материалы и методы. Эксперимент проводился с образцами из меди (М1) цилиндрической формы длиной 34,5 мм, диаметром 7,8 мм, массой около 15 г. Состав материала образца указан в таблице 1.

Таблица 1

Состав меди (М1)

Cu	Ag	Fe	Ni	S	As	Pb	O	Sb	Bi	Sn
> 99,9	<0,003	< 0,005	< 0,002	< 0,004	< 0,002	< 0,005	< 0,05	< 0,002	< 0,001	< 0,002

На баллистическом стенде были подобраны условия метания, которые обеспечивали на выходе из ствола скорость движения образца в диапазоне 150–450 м/с. Подбор условий был необходим, так как обычно для подобных экспериментов используются образцы существенно меньшей массы, которые метаются со значительно большей начальной скоростью. С помощью адаптации начальных условий и оборудования получилось обеспечить стабильное метание медного цилиндра с заданной скоростью. После эксперимента образцы были разрезаны на две равные части вдоль оси симметрии при помощи станка с ЧПУ DK7732 для электроэрозионной резки.

Микротвердость измерялась в плоскости разреза вдоль осевой линии образцов на твердомере ПТМ–3 согласно ГОСТ 9650–76 вдавливанием алмазных наконечников. Погрешность измерений данного прибора составляет 2 %. Значения микротвердости были рассчитаны также согласно ГОСТ 9650–76.

Расчет динамического предела текучести σ проводили по классической формуле Тейлора:

$$\sigma = \frac{\rho \upsilon^2 (L_0 - L_e)}{2(L_0 - L)\ln(\frac{L_0}{L_e})},$$

где ρ — плотность материала; υ — скорость удара; L_0 — начальная длина; L — конечная длина после соударения; L_e — длина упругой части образца. В данной формуле основными показателями являются длина упругой части образца и конечная длина цилиндра после удара.

Результаты исследования. *Микротвердость.* На рис. 1 продемонстрированы сечения медных образцов после удара с различными начальными скоростями. Для всех образцов имеет место область упругого деформирования с конечным диаметром, равным начальному, в том числе и для скорости 416 м/с. Упругая область переходит в пластическую, что сопровождается деформированием, в том числе в радиальном направлении, и, соответственно, ростом конечного диаметра. Ближе к контактной поверхности наблюдается зона интенсивных пластических деформаций, переходящая в зону разрушения материала цилиндра. Также присутствует незначительная асимметрия деформирования образцов, обусловленная особенностями метания, что может создавать некоторые трудности для прямого сравнения результатов экспериментов с численным моделированием при использовании оси симметрии или плоскости симметрии в постановке задачи.



Рис. 1. Сечения медных образцов после удара с различными начальными скоростями:
а — 162 м/с; *б* — 225 м/с; *в* — 316 м/с; *г* — 416 м/с

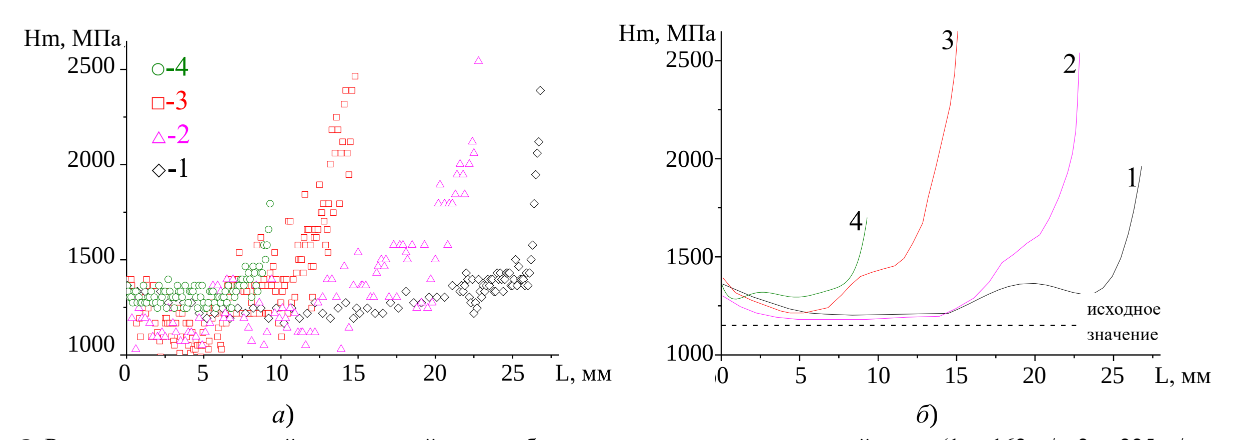


Рис. 2. Распределение значений вдоль осевой линии образцов для различных скоростей удара (1— 162 м/с, 2— 225 м/с, 3— 316 м/с, 4—416 м/с): *а* — микротвердости; *б* — рассчитанное осредненное распределение микротвердости

В исходном состоянии измеренное среднее значение микротвердости составляет 1150±100 МПа. Такой разброс значений, по-видимому, происходит из-за структурных особенностей материала и наличия в структуре неоднородностей. Рис. 2 *а* показывает распределение значений микротвердости вдоль осевой линии образца для различных скоростей удара, на рис. 2 *б* представлены результаты осреднения полученных значений.

Сравнивая средние значения микротвердости с величиной в недеформируемом образце (1150 МПа), получаем, что микротвердость во всей рассматриваемой области превышает исходное значение. Можно выделить несколько зон деформирования. Это тыльная область образца, где происходит незначительное увеличение микротвердости до значений 1250–1350 МПа, связанное, по-видимому, с воздействием давления газов при метании. В средней части микротвердость приближается к показателям недеформированных образцов. Далее, ближе к границе контакта, микротвердость начинает расти до значений 1400–1600 МПа с выходом на точку перегиба, после чего наблюдается резкий рост микротвердости до 1800–2700 МПа.

Максимальная микротвердость наблюдается при скорости удара, равной 316 м/с, при более высоких скоростях на рис. 2 наблюдается резкое снижение величины микротвердости. Падение микротвердости в образце для скорости удара 416 м/с обусловлено его разрушением в области удара и потерей части материала цилиндра в виде осколков.

Рассмотрим подробнее образец со скоростью удара 316 м/с. Для данного образца было сделано две серии измерений вдоль двух линий, которые условно названы С и С1. Расположение данных линий выбиралось из следующих соображений. Линия С располагалась вдоль оси симметрии, а линия С1 проходила через середину радиуса сечения образца. Во время измерений микротвердости вдоль каждой линии было сделано свыше 100 измерений. Данный массив значений микротвердости был осреднен, результат осреднения представлен на рис. 3.

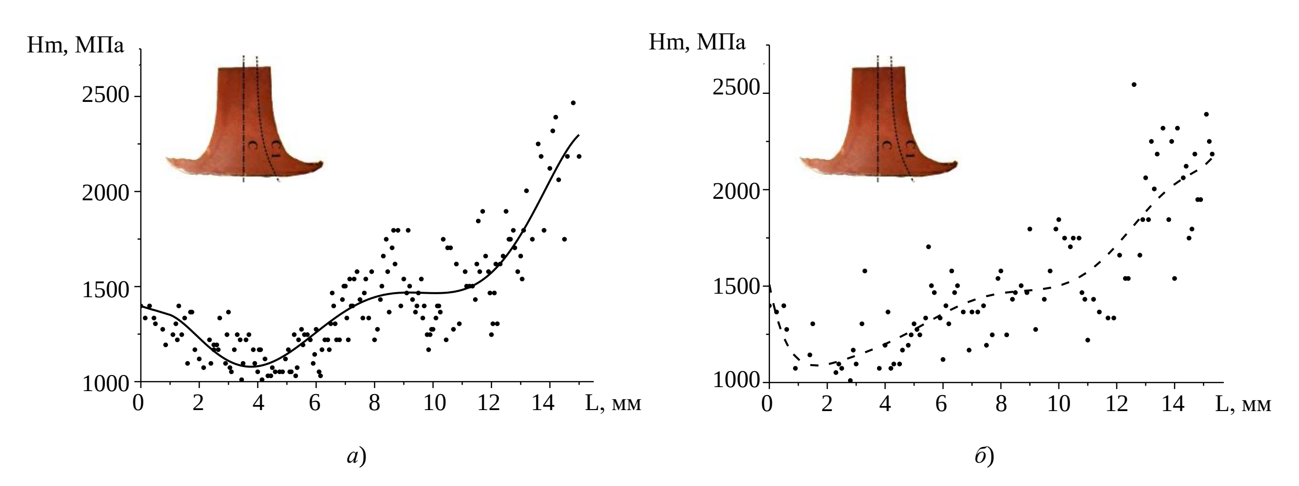


Рис. 3. Осредненное распределение микротвердости медного образца при скорости удара 316 м/с вдоль линий: *а* — С; *б* — С1

На рис. 3 видно, что обе кривые имеют нелинейный характер, причем распределение микротвердости в обоих случаях качественно подобны и количественно близки. Такие данные позволяют выделить области деформирования образцов и определить их размеры.

Области деформирования цилиндрических образцов. Предлагается рассмотреть схему деформирования цилиндрического образца, представленную на рис. 4 и включающую 4 области, размер которых определяется на основе анализа распределения микротвердости.

Зона 1 соответствует области упругих деформаций; 2 — пластических; 3 — интенсивных пластических деформаций; 4 — область материала; подвергающегося разрушению. В таблице 1 представлены размеры данных областей образцов в зависимости от скорости соударения, где υ — скорость удара; L — конечная длина после соударения; L_e — длина зоны упругих деформаций; L_p — длина зоны пластических деформаций; L_{ipf} — длина зоны интенсивных пластических деформаций; L_f — длина зоны разрушений; D_1 — диаметр тыльного торца цилиндра; D_2 — диаметр контактной границы.

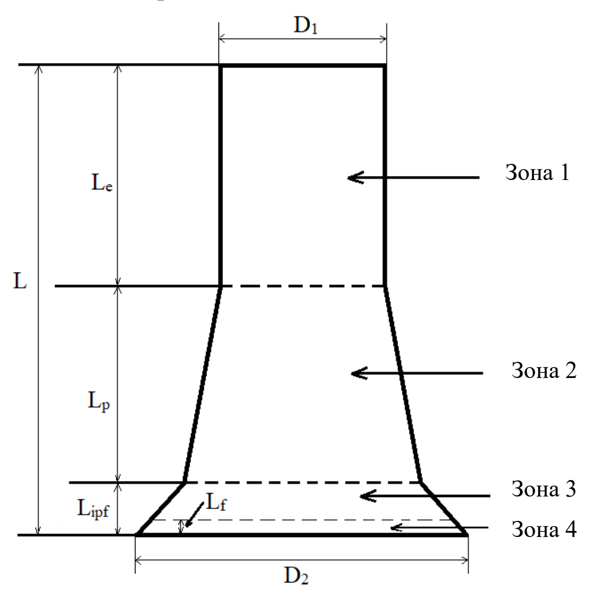


Рис. 4. Схема деформирования образца после соударения с жесткой стенкой

Таблица 2

Геометрические размеры областей деформирования образцов

υ, м/с	L, мм	L_e, мм	L_p, мм	L_{ipf}, мм	L_f, мм	D_1, мм	D_2, мм
0	34,5	0	0	0	0	7,8	7,8
162	26,1	12,34	10,63	3,13	0	7,8	12,7
225	22,5	9,78	9,51	3,21	0,93	7,8	15,8
316	16,1	5,87	6,83	3,4	1,14	7,9	21,4
416	9,3	3,5	1,38	4,42	2,01	7,9	31,28

Данные, приведенные в таблице 2, показывают, что у образца при скорости удара 162 м/с отсутствует зона разрушения материала, полученный образец является примером классического теста Тейлора, который в дальнейшем может быть использован для создания адекватной численной модели удара цилиндрического образца о жесткую преграду и подбора констант моделей материала. У образцов при скорости 225 и 316 м/с проявляются все 4 зоны, но по сравнению с образцом при скорости удара 416 м/с, зона разрушения мала. У цилиндра со скоростью удара 416 м/с после теста практически отсутствует зона пластической деформации, при данной скорости удара зона упругой деформации быстро переходит в зону интенсивных пластических деформаций, совмещенную с зоной разрушения.

Динамический предел текучести. Результаты расчета динамического предела текучести σ представлены на рис. 5 *а*. Значение скорости 416 м/с не было принято во внимание, так как в данном случае разрушение цилиндра значительное, что не позволяет применить данную методику расчета. Статический предел текучести меди М1 составляет 0,1 ГПа. Имеет место существенное увеличение значения динамического предела текучести по сравнению с его статическим значением, также наблюдается рост динамического предела текучести с ростом скорости удара.

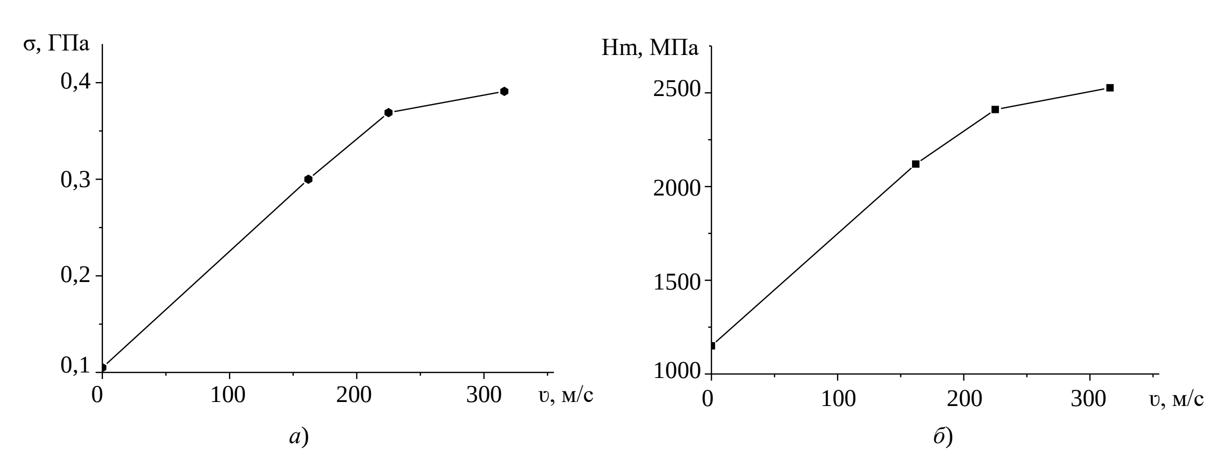


Рис. 5. Зависимости от скорости удара: *а* — динамического предела текучести и *б* — максимальной микротвердости

Рис. 5 *б* демонстрирует зависимость максимальной микротвердости образцов от скорости удара. Графики на рис. 5 *а* и 5 *б* качественно подобны, что предполагает корреляцию динамического предела текучести и максимальной микротвердости и возможность их взаимного пересчета.

Обсуждение и заключения. Представлены результаты экспериментов теста Тейлора для цилиндрических медных образцов в диапазоне скоростей удара 162–416 м/с. Полученные данные показывают, что после удара цилиндра по жесткой стенке микротвердость во всем образце превышает исходное значение, равное 1150 МПа, а в области удара наблюдается значительный рост микротвердости до 1800–2700 МПа. Предложено разделение деформированного цилиндра на 4 области: упругого деформирования, пластического, интенсивного пластического деформирования и разрушения. Даны оценки размеров указанных областей для исследованных скоростей удара. По классической формуле Тейлора рассчитан динамический предел текучести, который существенно превышает статический предел текучести и растет с ростом скорости удара. Показаны зависимости динамического предела текучести и максимального усредненного значения микротвердости от скорости удара образца по недеформируемой преграде. Выявлена корреляция максимальных усредненных значений микротвердости и динамического предела текучести, которые возрастают с ростом скорости удара. Представленные данные могут быть полезны для оценки адекватности используемой физико-математической модели для численного расчета задач высокоскоростного деформирования металлов и сплавов.

Список литературы

1. Лапшин, В. Л. Алгоритм управления упруго-вязко-пластичной моделью для исследования процессов ударного взаимодействия тел / В. Л. Лапшин, Е. В. Зеньков // Advanced Engineering Research. — 2021. — Т. 21. — С. 191−199. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-191-199

2. Dynamic Hardening of AISI 304 Steel at a Wide Range of Strain Rates and Its Application to Shot Peening Simulation / Sungbo Lee, Kwanghyun Yu, Hoon Huh [et al.] // Metals. — 2022. — Vol. 12. — P. 403. https://doi.org/10.3390/met12030403

3. Taylor Impact Tests with Copper Cylinders: Experiments, Microstructural Analysis and 3D SPH Modeling with Dislocation Plasticity and MD-Informed Artificial Neural Network as Equation of State / E. S. Rodionov, V. G. Lupanov, N. A. Gracheva [et al.] // Metals. — 2022. — Vol. 12. — P. 264. https://doi.org/10.3390/met12020264

4. Simple Shear Behavior of 2024-T351 Aluminum Alloy over a Wide Range of Strain Rates and Temperatures: Experiments and Constitutive Modeling / Bin Jia, Alexis Rusinek, Xinke Xiao, Paul Wood // International Journal of Impact Engineering. — 2021. — Vol. 156 — Art. 103972. https://doi.org/10.1016/J.IJIMPENG.2021.103972

5. Chong Gao. Instrumented Taylor Impact Test for Measuring Stress-Strain Curve through Single Trial / Chong Gao, Takeshi Iwamoto // International Journal of Impact Engineering. — 2021. — Vol. 157. — Art. 103980. https://doi.org/10.1016/J.IJIMPENG.2021.103980

6. Characteristics in Taylor Impact Test on Projectiles with Various Nose Shapes / Jun-Cheng Li, Gang Chen, Feng-Lei Huang, Yong-Gang Lu // Metals. — 2021. — Vol. 11. — P. 713. https://doi.org/10.3390/met11050713

7. Investigation on the Application of Taylor Impact Test to High-G Loading / Li Juncheng, Chen Gang, Lu Yonggang, Huang Fenglei // Frontiers in Materials. — 2021. — Vol. 8. — P. 717122. 10.3389/fmats.2021.717122

8. Sen, S. Taylor Impact Test Revisited: Determination of Plasticity Parameters for Metals at High Strain Rate / Subhajit Sen, Biswanath Banerjee, Amit Shaw // International Journal of Solids and Structures. — 2020. — Vol. 193 –194. — P. 357–374. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2020.02.020

9. Киселев, А. Б. Особенности процесса соударения упругопластического цилиндра с недеформируемой преградой / А. Б. Киселев, А. А. Серёжкин // Прикладная математика и механика. — 2015. — Т. 79. — С. 571–583. https://doi.org/10.1016/j.jappmathmech.2016.01.011

10. Баяндин, Ю. В. Верификация широкодиапазонных определяющих соотношений для упруговязкопластических материалов с использованием теста Тейлора-Гопкинсона / Ю. В. Баяндин, Д. А. Билалов, С. В. Уваров // Вычислительная механика сплошных сред. — 2020. — Т. 13. — С. 449–458.

11. Моделирование процесса динамического канально-углового прессования медных образцов с учетом экспериментальных условий нагружения / Д. В. Янов, А. С. Бодров, Н. В. Пахнутова, С. А. Зелепугин // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. — 2019. — № 60. — С. 141–151. https://doi.org/10.17223/19988621/60/11

12. Численное моделирование процессов динамического канально-углового прессования титановых образцов / А. С. Бодров, Н. В. Олимпиева, А. С. Зелепугин, С. А. Зелепугин // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. — 2015. — № 5 (37). — С. 56–63. http://dx.doi.org/10.17223/19988621/37/5

13. Трехмерное моделирование процессов пластического деформирования металлических образцов при динамическом канально-угловом прессовании / С. А. Зелепугин, А. С. Зелепугин, А. С. Бодров, Н. В. Олимпиева // Известия высших учебных заведений. Физика. — 2013. — Т. 56. — С. 50–52.

14. Armstrong, R. W. Constitutive Relations for Slip and Twinning in High Rate Deformations: A Review and Update / R. W. Armstrong // Journal of Applied Physics. — 2021. — Vol. 130. — P. 245103. https://doi.org/10.1063/5.0075916

15. Khristenko, Y. F. New Light-Gas Guns for the High-Velocity Throwing of Mechanical Particles / Y. F. Khristenko, S. A. Zelepugin, A. V. Gerasimov // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. — 2017. — Vol. 12. — P. 6606–6610.

Поступила в редакцию 08.06.2022
Поступила после рецензирования 11.07.2022
Принята к публикации 11.07.2022

Об авторах:

Пахнутова Надежда Владимировна, аспирант кафедры «Механика деформируемого твердого тела» Национального исследовательского Томского государственного университета (634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, 36), младший научный сотрудник научно-исследовательского отдела «Структурная макрокинетика» Томского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук (634055, РФ, г. Томск, пр. Академический, 10/4), ScopusID, ORCID, nadin_04@mail.ru

Боянгин Евгений Николаевич, ведущий инженер научно-исследовательского отдела «Структурная макрокинетика» Томского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук (634055, РФ, г. Томск, пр. Академический, 10/4), кандидат технических наук, ScopusID, ORCID, jeck2000@list.ru

Шкода Ольга Александровна, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела «Структурная макрокинетика» Томского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук (634055, РФ, г. Томск, пр. Академический, 10/4), кандидат технических наук, ScopusID, ORCID, O.Shkoda@dsm.tsc.ru

Зелепугин Сергей Алексеевич, ведущий научный сотрудник, начальник научно-исследовательского отдела «Структурная макрокинетика» Томского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук (634055, РФ, г. Томск, пр. Академический, 10/4), профессор кафедры «Механика деформируемого твердого тела» Национального исследовательского Томского государственного университета (634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, 36), доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ScopusID, ORCID, szel@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

Н. В. Пахнутова — участие в проведении экспериментальных исследований, обработка полученных результатов, написание черновика статьи, формулирование предварительных выводов. Е. Н. Боянгин — фотографирование образцов, измерение микротвердости образцов, обработка полученных результатов. О. А. Шкода — измерение микротвердости, обработка полученных результатов. С. А. Зелепугин — определение целей и задач исследования, организация и проведение экспериментальных работ, редактирование текста статьи и выводов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.